

新しく提案する渋滞判定手法に基づいた渋滞発生確率推定モデルの構築*

A Method of Estimating Breakdown Probability Based on an Alternative Definition of Traffic Congestion*

塩見康博**・吉井稔雄***・北村隆一****

By Yasuhiro SHIOMI**・Toshio YOSHII***・Ryuichi KITAMURA****

1. はじめに

Highway Capacity Manual 2000¹⁾によると, "Capacity" は "The maximum number of vehicles that can pass a given point during a specified period under prevailing roadway, traffic and control condition" と定義されており, Capacityを上回る需要交通量が流入すれば渋滞が発生するとされている. しかし, 交通流はそれぞれが独立した意志を持った車両によって構成されており, 1台1台異なる走行特性を持つ. そのため, 同一のボトルネックで, 天候・時間帯・道路の路面状況が同じであっても, 渋滞を発生させる交通量にバラツキがあるという報告がなされている²⁾.

そこで近年, 渋滞の発生を確率事象と捉えようとする研究がなされており, 5分や15分といった特定の時間帯における流入交通量に対して渋滞発生確率を定義し, この確率の導出に関する研究が報告されている³⁾. これらの既存研究では渋滞発生確率を「ある交通量階層の渋滞発生回数/ある交通量階層の出現回数」と定義し, 実観測に基づいて, 交通量階層別の渋滞発生確率を導出している. しかし, これらの手法では, 各時間帯で観測された交通量に対して, その後の時間帯において渋滞が発生する確率を表現している. すなわち, 渋滞発生の有無が対象とする時間帯以降の交通量に依存し, 例えば, 大きな需要が押し寄せ, ボトルネックにおいて渋滞現象が観測されたとしても, それ以降に到着する交通量が少なければ渋滞とは判定されない. このため, 必ずしも流入交通量に対する渋滞発生確率を推定していることにはならない.

そこで, 本稿では, 流率が低下するという渋滞現象と需要交通レートとの関係を直接的に記述した渋滞発生確率を定義するとともに, 一定の需要交通レート下において渋滞発生確率を算定する理論モデルを構築する. 具体的には, まず, 車群と渋滞発生の関係について分析を行い, その知見に基づいて車群の形成に着目した新しい

*キーワード: 車群, 交通流, 交通容量, 渋滞

**学生員, 工修, 京都大学大学院工学研究科

(京都市左京区吉田本町, Tel075-753-5135, Fax075-753-5916)

***正員, 博士(工学), 京都大学大学院工学研究科

****正員, Ph.D, 京都大学大学院工学研究科

渋滞判定手法を提案する. 続いて, 高速道路の暫定供用区間などに見られる片側1車線区間を対象に需要交通レートの関係で渋滞発生確率を説明するモデルを構築する.

2. 車群の形成と渋滞発生確率

既存研究⁴⁾より, 車群の形成は渋滞の発生と大きな関係性があることが指摘されている. そこで, 本章では車群に属する車両の走行特性について詳細に分析し, 車群と渋滞の関係を明確にする.

(1) 車群中の車両走行特性

車群に属して走行する車両を, 車群中での走行位置の違いにより, a) 先頭車両に直接追従する車両, b) 先頭車両を視認できる位置で走行する車両, c) 先頭車両を視認できない位置で走行する車両に分類する. a)に属する車両は前方を走行する1台限りの車両挙動にのみ注意を払いながら追従走行するのに対し, b)に属する車両は前方を走行する複数台の車両挙動に対応すべく追従を行うと考えられる. 一方, c)に属する車両の運転手は車群の先頭を視認できないため, 現在の交通状況を渋滞状態であると感じ取り, 前方車両に対する追従が緩慢になると考えられる. そこで, 本研究では,

車群中を走行する車両の追従特性は, 先頭車両との位置関係によって3段階に分類され, 車群中後方を走行する車両ほど車頭時間が大きい

という仮説を措定する.

仮説の検証に当たり, 東海北陸自動車道上り線の48.43kp地点, 同59.07kp地点, 同72.60kp地点の計3地点で, 既存の渋滞判定法において渋滞が発生していない状況を対象に車両速度, 及び車頭時間に関する観測を行った. 各観測地点の概要, 及び観測概要を表1にまとめる.

以下では, 観測により得られた各車両の車頭時間データより車群を抽出し, 10台以上の車両で構成される車群を対象に分析を行う. 本研究では「車頭時間が9.0[sec]以上, かつその直後の車両の車頭時間が2.5[sec]以下の車両」を車群の先頭車両と定義し, 車群として追従する車両を「車頭時間が4.0[sec]未満の車両」と定義し, 車群の先頭から何台目を走行しているかを示す車群中の走行位置と車頭時間の関係を調べる.

表1 各地点での観測概要

観測地点	東海北陸自動車道上り線48.43kp	東海北陸自動車道上り線59.07kp	東海北陸自動車道上り線72.60kp
観測日時	2004年2月22日9:00-翌23日14:00	2004年2月22日9:00-翌23日14:00	2004年7月18日13:00-19:00, 19日13:00-17:00
観測方法	トラフィックカウンター	トラフィックカウンター	デジタルビデオカメラ
車線構成	暫定2車線(片側1車線)	暫定2車線(片側1車線)	暫定2車線(片側1車線)
縦断勾配	2.57%の上り勾配	3.00%の上り勾配	4.00%の上り勾配
平面曲線[m]	R = 2000	R = 2000	R = ∞
備考	22日13:30-19:00で渋滞発生	22日13:30-19:00で渋滞発生	19日15:45-17:00で渋滞発生

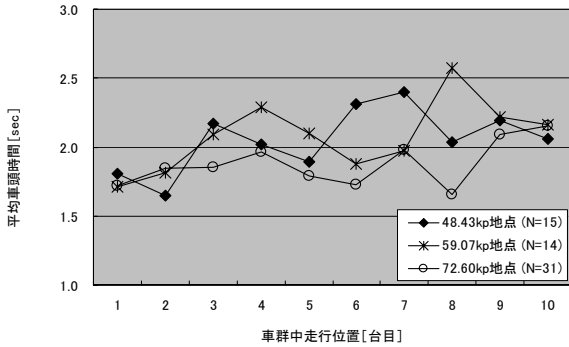


図1 車群中走行位置と車頭時間の関係

表2 分散分析の結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値
観測地点	1.0	2	0.50	0.88
走行位置	5.7	2	2.84	5.00 *
観測地点 * 走行位置	1.6	4	0.40	0.70
誤差	335.5	591	0.57	
総和	2674.3	600		

* p=0.01

表3 多重比較の結果

(I) 走行位置	(J) 走行位置	平均値の差 (I-J)	標準誤差	有意確率
車群先頭より1台目	2台目から8台目	-0.21	0.10	0.10
	9台目以降	-0.40	0.12	0.00
2台目から8台目	車群先頭より1台目	0.21	0.10	0.10
	9台目以降	-0.19	0.08	0.05
9台目以降	車群先頭より1台目	0.40	0.12	0.00
	2台目から8台目	0.19	0.08	0.05

図1に車群中走行位置とその位置を走行する車両の車頭時間の平均値の関係を示す。図より、車群中前方を走行する車両より後方を走行する車両の方がその車頭時間が大きくなる傾向にあることを読み取れる。この差が統計的に有意であることを示すために、車群中走行位置を a) 先頭車両の直後を走行する車両、b) 車群中走行位置が先頭から2~8台目の車両、c) 同9台目以降の車両、の3段階に分類し、観測地点と車群中走行位置を因子とする2元配置の分散分析を行った。分散分析の結果を表2に、また多重比較の結果を表3に示す。

表2より、走行位置に関するF値が十分に大きいこと、そして観測地点と走行位置の交互作用に関するF値が十分に小さいことから、車群中走行位置に関して、各水準(車群先頭より1台目、2~8台目、9~10台目)間でその車頭時間に有意な差があることが分かる。また、表3より、車群先頭から1台目、2~8台目、9台目以降と走行位

置が車群中後方になるにつれ、その車頭時間が有意に増加することが示された。

以上より、車群として走行する車両に関して、その前方車両に対する追従挙動特性は、車群の先頭から1台目、2~8台目、9台目以降の3段階に分類できること、さらに、車群中の後方を走行する車両ほど追従時の車頭時間が大きくなることを示した。これは仮説を支持する結果である。

(2) 渋滞発生確率の定義

前節において、車群の後方において車頭時間が大きくなること、言い換えると車群の後方で交通流率が低下することを示した。本節では、この結果を受けて以下のように渋滞発生確率を定義する。

ボトルネックに流入する車群が小さい場合は、車群中後方の交通流率の低い状況が出現しても、その継続時間は短く車群の通過とともに流率が低下した状態は解消する。しかし、大きな車群が流入した場合には、流率の低い車群中後方の車両がボトルネックを通過する状態が長時間に渡り継続することとなる。さらに、車群が通過する以前に後続の車群が追いつくと、流率の低下した状態が引き続き継続されることとなる。

この流率低下現象に着目し、車群中後方を走行する車頭時間の大きい車両が一定時間 T_{cong} 以上継続してボトルネックを通過する状態が生じた場合に渋滞が発生したと定義する。さらに、無限に長い時間に亘ってある一定の需要レートで車両が発生し続けている状態を考える。このとき、車両は異なるサイズの車群を形成してボトルネック地点を通過することとなり、大きな車群が通過する場合に車群後方の流率の低下した状態が生起する。ここで、ある時刻を抽出した際に、その時刻から車群後方の流率の低下した状態が T_{cong} 以上継続する確率を以て渋滞発生確率として定義する。

3. 渋滞発生確率推定モデルの構築

本章では、最下流端がボトルネックとなっている片側1車線区間を想定し、希望走行速度分布を所与として、需要交通レート、片側1車線区間長の関係で渋滞発生確率を推定するモデルを構築する。

(1) 車群台数分布の推定

追越しの禁止された区間長 L の片側1車線区間で形成される車群の車群台数分布を推定するモデルを構築する。

この時、交通流に関して以下の仮定をおく。

- i) 自由走行時には、それぞれの車両の希望走行速度で走行する。このとき、希望走行速度の分布 $f(v)$ を所与とする。
- ii) 各車両は前方の車両に追いつくまで希望走行速度を維持し、前方車両との車頭時間が予め決定した値に達した瞬間に前方車両の走行速度と等しい速度に減速する。
- iii) 車群中を走行する車両の車頭時間は先頭車両との位置関係に応じて決定される。具体的には、先頭車両に直接追従する車両の車頭時間を hw_α 、先頭車両から 2 台目 $\sim \gamma-1$ 台目を走行する車両の車頭時間を hw_β 、 γ 台目以降を走行する車両の車頭時間を hw_γ とする。ただし、 $hw_\alpha < hw_\beta < hw_\gamma$ とする。

この仮定に基づいた片側1車線区間での走行軌跡の例をタイムスペースダイアグラム (図2) に表す。図中、実線は各車両の走行軌跡を、破線は自由走行した場合の軌跡を示す。また、 $t_d(i)$ は i 番目に発生した車両が当該区間の始点を出発した時刻を表す。図2では、車両 i の希望走行速度が低いために後続車両 $i+1 \sim i+4$ が前方走行車両に追いつき、車両 i を先頭とする車群が形成される様子が表されている。このように、片側1車線区間において自由走行を維持することのできる車両が車群の先頭車両となり、その車両に対して後続の車両が追いつくことで1つの車群が形成される。そこで、希望走行速度 v を持つ車両が車群の先頭となる確率 $P^{Top}(v)$ を求め、さらに希望走行速度 v の車両を先頭とする車群の車群台数が k 台となる確率 $P_v^{plt}(k)$ を求めた後、式(1)によって任意の車両が k 台の車群の先頭車両となる確率 $P^{plt}(k)$ を算定する。

$$P^{plt}(k) = \int_0^\infty f(v) \cdot P^{Top}(v) \cdot P_v^{plt}(k) dv \quad (1)$$

まず、希望走行速度 v を持つ車両 (以下「当該車両」) が車群の先頭となる確率について考える。当該車両が車群の先頭になるためには、当該車両が一つ前を走行する車両 (以下では「先行車両」) に追いつかないことと同値であり、少なくとも先行車両が区間内を希望走行速度で走行した場合に、これに追いつかないことが必要となる。一方、先行車両は必ずしも希望走行速度で走り続けるとは限らず、一つ前を走行する車両に区間内で追いつく場合には、追いついた地点から走行速度が低下することになる。この場合、当該車両が先行車両に追いつかないための条件は、先行車両が取り付いた車群の先頭車両との関係から、

$$t_a(\text{当該車両}) \geq t_a(\text{車群先頭車両}) + H \quad (2)$$

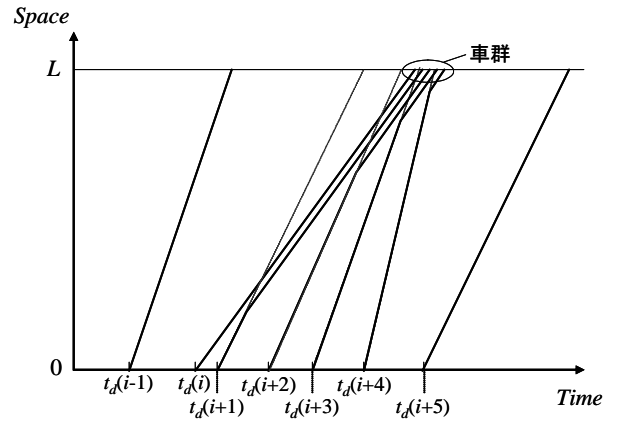


図2 各車両の走行軌跡の例

として記述される。ここで、 $t_a(i)$ は、車両 i が希望走行速度 v_i で最後まで区間内を走行した場合の区間終点への到達時刻を示す (式(3))。

$$t_a(i) = t_d(i) + \frac{L}{v_i} \quad (3)$$

また、 H は当該車両が車群に取り付いた場合の車群先頭車両からの車頭時間の和を示し、式(4)で定義される H_k を用いて算出される。

$$H_k = \begin{cases} hw_\alpha & (k=1) \\ hw_\alpha + (k-1) \cdot hw_\beta & (2 \leq k < \gamma-1) \\ hw_\alpha + (\gamma-2) \cdot hw_\beta + (k-\gamma+1) \cdot hw_\gamma & (\gamma \leq k) \end{cases} \quad (4)$$

以上より、当該車両が車群の先頭となるためには、前方を走行する全ての車両について、その車両を先頭とする車群に取り付かないこと、すなわち任意の $k (=1,2,\dots)$ に関して、

$$t_a(i) \geq t_a(i-k) + H_k \quad (5)$$

を満たすことが必要十分条件となる。

このとき、車両 i が前方の車両に追いつかない確率 P_i は、

$$P_i = \prod_{k=1}^{\infty} \Pr[t_a(i) > t_a(i-k) + H_k] \quad (6)$$

となる

また、当該車両を車両 i 、車群先頭車両が当該車両の k 台前方を走行する車両 $i-k$ とし、各車両の希望走行速度を用いて式(2)を書き換えると、

$$v_{i-k} > \frac{L}{t_d(i) + \frac{L}{v_i} - H_k - t_d(i-k)} \quad (7)$$

となり、希望走行速度 v を持つ車両が車群の先頭となる

確率は,

$$P^{Top}(v) = \prod_{k=1}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} \frac{L_{[t_d(i)+\frac{L}{v_i}-H_k-t_d(i-k)]}}{L_{[t_d(i)+\frac{L}{v_i}-H_k-t_d(i-k)]}} f(v) dv \right] \quad (8)$$

となる. これより, 任意の車両が車群の先頭となる確率 P^{Top} は,

$$P^{Top} = \int_0^{\infty} f(v) \cdot P^{Top}(v) dv \quad (9)$$

となる.

続いて, 希望走行速度 v の車両を先頭とする車群の車群台数が k 台となる確率を求める. ただし, ここでは, 1台のみで単独走行している場合を1台の車群と見なす. k 台の車群が形成されるということは, 希望速度 v_i を持つ車両 i が車群の先頭となり, かつ車両 $i+1 \sim$ 車両 $i+(k-1)$ が先行車両に追い付き車群を形成するが, 車両 $i+k$ はこの車群に追い付かないことに等しい. すなわち,

$P_v^{Plt}(k)$ は,

$$P_v^{Plt}(k) = P^{Top}(v_i) \cdot \left[\int_0^{\infty} \frac{L_{[t_d(i+k)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_k\]}}{L_{[t_d(i+k)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_k\]}} f(v) dv \right] \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \left[\int_0^{\infty} \frac{L_{[t_d(i+j)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_j\]}}{L_{[t_d(i+j)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_j\]}} f(v) dv \right] \quad (10)$$

となるので, 任意の車両が k 台の車群の先頭になる確率は,

$$P^{Plt}(k) = \int_0^{\infty} P^{Top}(v_i) \cdot \left[\int_0^{\infty} \frac{L_{[t_d(i+k)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_k\]}}{L_{[t_d(i+k)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_k\]}} f(v) dv \right] \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \left[\int_0^{\infty} \frac{L_{[t_d(i+j)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_j\]}}{L_{[t_d(i+j)-\{t_d(i+\frac{L}{v_i})-H_j\]}} f(v) dv \right] \cdot dv_i \quad (11)$$

となる.

以上より, k 台の車群が形成される確率 $P(k)$ は希望走行速度分布, 片側1車線区間長を与件として,

$$P(k) = \frac{P^{Plt}(k)}{P^{Top}} \quad (12)$$

で算定することができる.

(2) 渋滞発生確率の推定

今, 先頭車を含めて k 台の車両で構成される車群が区間の終点であるボトルネックを通過する状況を考える. ただし, ボトルネック通過の際の車群に属する車両の車頭時間は, 前節と同様に車群前方から順に $hwb_\alpha, hwb_\beta, hwb_\gamma, hwb_\alpha < hwb_\beta < hwb_\gamma$ とする. このとき, 車群中後方の流率の低下した状態, すなわち各車両の車頭時間が hwb_γ である状態は, $\{i - (\gamma - 1)\} \cdot hwb_\gamma$ だけ継続され, 第2章にて定義した「ある時刻を抽出した際に, その時

刻から車群後方の流率の低下した状態が T_{cong} 以上継続する」に該当する時刻の時間幅 $t_{cong}(k)$ は,

$$t_{cong}(k) = \max\left\{\{i - (\gamma - 1)\} \cdot hwb_\gamma - T_{cong}, 0\right\} \quad (13)$$

となり, 需要交通レート Q に対する渋滞発生確率は,

$$P_{cong}(Q) = \frac{Q}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P(k)} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \{P(k) \cdot t_{cong}(k)\} \quad (14)$$

で算定される. 式(14)中, 右辺第1項は需要交通レートに対する期待車群数を表し, 第2項は各車群内における期待渋滞時間を表している. これにより, 本研究で定義する渋滞発生確率を求めることができる.

4. 今後の展望

本稿では, 流率が低下するという渋滞現象と需要交通レートとの関係を直接的に記述する渋滞発生確率を定義し, 特定の状況下ではあるが一定の需要交通レート下において渋滞発生確率を推定する理論モデルを構築した.

しかしながら, 今回提案した渋滞発生確率推定モデルは, 該当区間内における詳細な車両の動きを考慮していない. 言い換えれば, 区間旅行時間とボトルネック地点に Point Queue を想定することによって交通流を表現している. 今後は, この枠組みを拡張して, 車長を考慮した Physical Queue の概念の下で理論を構築していきたい. その際, 需要交通量レベルに対応した形で車群長のデータを取得する必要がある. 車両の走行軌跡を取得することができるプローブデータを利用して, 対象とする道路区間を走行する車両が前方車両に追い付き, その後車群中を走行する過程を示す観測データを収集する予定である.

最後に, 本研究を進めるにあたって, 中日本高速道路株式会社中央研究所長の吉川良一氏, (財) 高速道路技術センターの皆様には, データを提供頂くなど大変お世話になりました. ここに記して謝意を示します.

参考文献

- 1) National Research Council: Highway Capacity Manual Manual 2000, Transportation Research Board Special Report 209, TRB, Washington, D.C., 2000.
- 2) 岡村秀樹, 渡辺修治, 泉正之: 高速道路単路部の交通容量に関する調査研究 (下), 高速道路と自動車, Vol.44, No.3, pp.30-40, 2001.
- 3) 例えば, Lorenz, M., Elefteriadou, L.: A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, pp.84-95, 2000.
- 4) 例えば, 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, IV-5, pp.1-7, 1986.